Archive of SID

تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس

حجت باقری[۱] و روزبه دبیری*[۲]

۱ و ۲- گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

نویسنده مسئول: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir *

دریافت: ۹۷/۵/۱۱ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۲

چکیده

بهسازی و تقویت خاک‌های مساله‌دار از نظر ویژگی‌های ژئوتکنیکی نیازمند استفاده از مصالح مناسب است. بنابراین خرده‌های لاستیک می‌تواند بعنوان یک گزینه پیشنهادی جدید، در این خصوص مطرح شود. از سوی دیگر، امروزه دفع لاستیک‌های فرسوده یکی از معضلات و مسائل اساسی از نظر محیط‌زیست می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر به بررسی بهبود توانایی باربری خاک رس کائولن همراه با مخلوط ذرات زائد لاستیک‌های فرسوده (باهدف کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی) بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی پرداخته شده است. ذرات گرانول لاستیک بازیافتی در قطرهای ۱ ،۳ و ۵ میلی‌متر با درصدهای ۲/۵، ۵، ، ۷/۵ و۱۰ با خاک رس مخلوط شدند. جهت بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده، آزمون‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم و نفوذپذیری بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان داد، میزان بهینه اندازه ذرات گرانول لاستیک و مقدار آن‌ها در خاک رس به ترتیب برابر ۱ میلی‌متر و ۲/۵ درصد می‌باشد. این مقادیر باعث کاهش قابل‌توجه نسبت تخلخل حداقل در خاک رس تثبیت شده گردیده است. نتیجه آن، افزایش توانایی باربری، تراکم پذیری می‌باشد. از سوی دیگر، افزودن ذرات گرانول لاستیک بازیافتی در تمامی ابعاد و درصدهای وزنی در خاک رس سبب افزایش میزان نفوذپذیری گردید.

واژه‌های کلیدی: خاک رس کائولن، گرانول لاستیک بازیافتی، ژئوتکنیک زیست محیطی، بهسازی، خصوصیات ژئوتکنیکی

۱- مقدمه

گسترش جمعیت، توسعه روز افزون صنعت، تغییر الگوی مصرف و حفاظت از محیط‌زیست از یک طرف، محدودیت مواد و انرژی از سوی دیگر موجب شده که استفاده بهینه از منابع طبیعی و حفاظت از آن‌ها در دستور کار جوامع مختلف به ویژه جوامع صنعتی قرار گیرد. در کشور ایران نیز صنعت بازیافت و مخصوصا استفاده مجدد مواد زائد در دستور کار قرار گرفته است (زارع شورجه،۱۳۹۰). دفن لاستیک‌های فرسوده در مراکز دفن زباله اقتصادی امکان‌پذیر نیست. زیرا فضای مراکز دفن زباله محدود است و خطرات موثر زیست‌محیطی از جمله خطر بالای آتش‌سوزی را ایجاد می‌کند. برای رفع این مشکل باید لاستیک ضایعاتی را بازیافت نمود. در حال حاضر بدلیل اقتصادی نبودن روش‌های بازیافت هنوز بکارگیری لاستیک‌های ضایعاتی به صورت گسترده رایج نمی‌باشد (زارع شورجه،۱۳۹۰). از سوی دیگر، انتخاب نوع ماده تثبیت کننده جهت بهسازی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، تابع عوامل متعددی از قبیل نوع خاک، شرایط جوی و جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، میزان بارگذاری، هدف از تثبیت، هزینه عملیات، فراوانی ماده تثبیت کننده و هزینه تهیه آن می‌باشد. برای تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مساله‌دار امروزه از روش‌های مکانیکی و شیمیایی مختلفی استفاده شده است. با گذر زمان و انجام پژوهش‌های متعدد نقایص و مزایای آن‌ها مشخص گردد، این امر باعث شد تا محققین به بررسی کاربرد مواد دیگری برای تثبیت خاک در نظر گیرند که ضایعات لاستیکی یکی از این موارد است. استفاده از لاستیک‌های فرسوده از لحاظ زیست‌محیطی در پروژه‌های مهندسی عمران به علت چگالی کم، ماندگاری بالا، دوام حرارتی بالا و هزینه کم آن‌ها سودمند است. در مهندسی عمران می‌توان به مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربردهای لاستیک‌های فرسوده برای مسلح‌سازی خاک‌های نرم در جاده‌سازی توسط (بوسشر و همکاران، ۱۹۹۱)، پایدارسازی شیب‌ها توسط (پوه و برومس، ۱۹۹۵)، مصالح سبک برای خاکریز پشت دیوار حائل توسط (بوسشر و همکاران،۱۹۹۱؛ پوه و

www.SID.ir

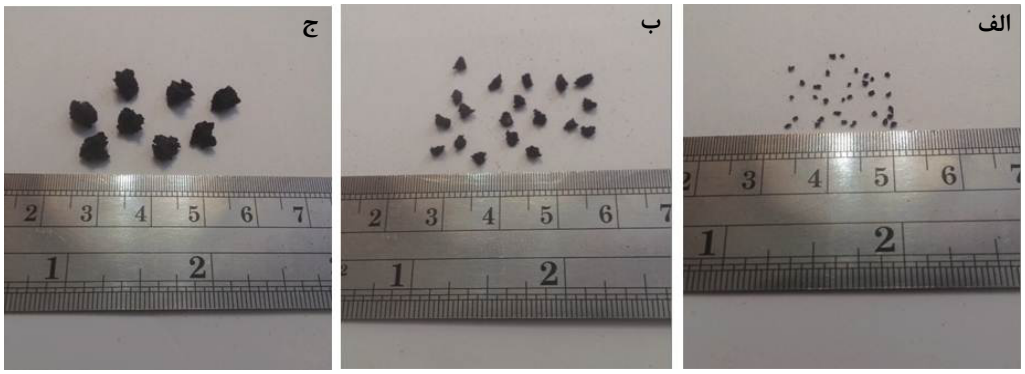
Archive of SID

برومس، ۱۹۹۵؛ لی و همکاران، ۱۹۹۹؛ ادیل و بوسشر، ۱۹۹۴؛ چتین و همکاران، ۲۰۰۶؛ آیوسیرامان و مینا، ۲۰۱۱؛ راتنام و همکاران، ۲۰۱۶)، مصالح زهکش شیرآبه در مدفن‌های بهداشتی توسط (ایدیل، ۲۰۰۴) و (واریس و سوداکار، ۲۰۰۶) اشاره نمود. هم‌چنین، برای بررسی تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی خرده لاستیک و مخلوط‌های ماسه- خرده لاستیک و یا پودر لاستیک نیز پژوهش‌های مختلفی توسط (وو و همکاران، ۱۹۹۷؛ یانگ و همکاران، ۲۰۰۲ و یووای و برگادو، ۲۰۰۴) اشاره نمود. در زمینه تثبیت و بهسازی خاک رس با استفاده از ذرات بازیافتی لاستیک می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط (چنین و همکاران، ۲۰۰۶؛ اسدزاده و سلطانی، ۱۳۹۱؛ ارثی‌زاد و همکاران، ۱۳۹۴؛ کارآمد تبریزی و همکاران، ۱۳۹۴؛ وادی و همکاران، ۲۰۱۵؛ رهگذر و صابرایان، ۲۰۱۶؛ سولانکی و همکاران، ۲۰۱۷ و سینگ و سونتوال، ۲۰۱۷) انجام گرفته است. هدف اصلی در تحقیق حاضر بررسی تاثیر میزان ذرات گرانول لاستیک بازیافتی و ابعاد آن‌ها در بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک رس کائولن می‌باشد. با بررسی مطالعات صورت گرفته مشاهده گردید عموما، خاک ریزدانه با شاخص خمیری بالا و ذرات بازیافتی لاستیک با درصدهای بالاتر، ابعاد بزرگ‌تر و در شکل‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در این تحقیق سعی شده است ذرات گرانول لاستیک بازیافتی با ابعاد ریز ۱ تا ۵ میلی‌متر انتخاب شده و با درصدهای پایین ۲/۵، ۵، ، ۷/۵ و۱۰ با خاک رس کائولن مخلوط شده و تاثیر افزودن ذرات گرانول لاستیک بر روی ساختار قرارگیری ذرات خاک رس در کنار یکدیگر براساس تغییرات نسبت تخلخل حداقل مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد

همچنان اشاره گردید، هدف از تحقیق حاضر امکان بررسی تاثیر ذرات گرانول لاستیک بر روی ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری خاک رس کائولن است. برای مطالعه، خاک رس کائولنی با نام تجاری ZMK2 از کارخانه صنایع خاک چینی ایران در نزدیکی شهر مرند تهیه گردید. تصویر خاک رس مورد استفاده در شکل (۱) ارائه شده و خصوصیات شیمیایی و کانی‌های آن طبق جدول (۱) می‌باشد. تصویر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی مورد استفاده طبق شکل (۲- الف، ب و ج) می‌توان مشاهده نمود.

شکل ۱. خاک رس کائولن مورد مطالعه



شکل ۲. تصویر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی مورد مطالعه: الف- ۱ میلی‌متر، ب- ۳ میلی‌متر، ج- ۵ میلی‌متر

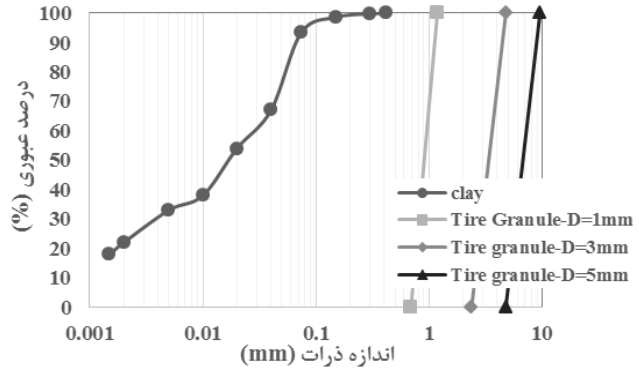
www.SID.ir

Archive of SID

منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D421 و ASTM D422 تعیین شده و طبق شکل (۳) قابل مشاهده است. خصوصیات خمیری خاک رس مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D4318-95a برآورد گردید. بطوری‌که مقدار شاخص خمیری آن برابر ۱۲ تعیین شد. چگالی ویژه مصالح مخلوط نیز طبق استاندارد ASTM D854 اندازه‌گیری شده و طبق جدول (۲) می‌توان مشاهده نمود. با توجه به منحنی دانه‌بندی و سیستم نام‌گذاری متحد خاک رس کائولن مورد مطالعه از نوع CL است.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی خاک رس ZMK2 مورد مطالعه (صنایع چینی ایران)

درصد وزنی در کائولن (ZMK2)	عناصر شیمیایی تشکیل‌دهنده	نوع کانی	درصد
۶	L.O.I	کائولینیت	۴۱
۷۴	SiO_2	کوارتز	۵۲
۱۵	Al_2O_3	کلسیت	۳
۰/۴۵	Fe_2O_3	سایر	۴
۰/۰۴	TiO_2		
۱/۵	CaO		
۰/۴	MgO		
۰/۳۵	Na_2O		
۰/۳	K_2O		
-	SO_4		



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک رس مورد مطالعه و ذرات گرانول لاستیک بازیافتی

جدول ۲. مقادیر چگالی ویژه مصالح مخلوط مورد مطالعه

خصوصیات ژئوتکنیکی	Gs		
اندازه گرانول لاستیک / مصالح	۱ (میلی‌متر)	۳ (میلی‌متر)	۵ (میلی‌متر)
رس+۲/۵ درصد لاستیک	۲/۷	۲/۶۸	۲/۶۶
رس+۵ درصد لاستیک	۲/۶۷	۲/۶۵۶	۲/۵۷
رس+۷ درصد لاستیک	۲/۶۴	۲/۶۰۸	۲/۵۵۹
رس+۱۰ درصد لاستیک	۲/۵۹	۲/۵۷	۲/۵۲

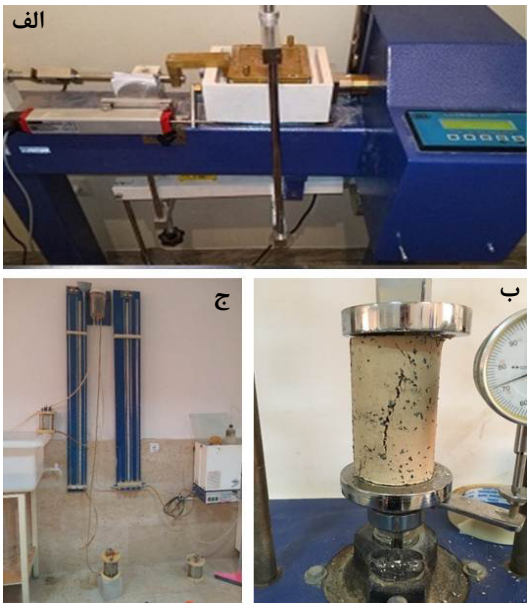
۳- روش انجام آزمایش

در تحقیق حاضر خاک رس کائولن با ذرات گرانول لاستیک بازیافتی با درصدهای وزنی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ و با اندازه‌های ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر مخلوط گردیده است تا امکان بهبود خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رسی ارزیابی گردد. جهت بدست آوردن نمونه‌های همگن، مصالح مورد مطالعه بصورت خشک با یکدیگر و سپس با آب مخلوط شده‌اند. در ادامه، در ظروف پلاستیکی سر بسته به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و در انتها آزمون‌های آزمایشگاهی مورد نظر انجام گرفته است. بدین

www.SID.ir

Archive of SID

منظور، ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. سپس بمنظور تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس کائولن تثبیت شده، در مرحله اول آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D2166 صورت پذیرفت (شکل ۴- ب). در مرحله دوم، آزمون برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-11 برای نمونه‌های با ابعاد ۱۰× ۱۰ سانتی‌متر مربع بصورت کنترل کرنش تحت اثر بارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام گرفت. لازم بذکر است، عملیات بارگذاری نمونه‌های مورد مطالعه با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت (شکل ۴- الف). برای بررسی تاثیر میزان ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر روی نفوذپذیری خاک رسی مورد مطالعه، آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع متغیر طبق استاندارد ASTM D5084 انجام گرفته است (شکل ۴- ج). برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق جدول (۳) قابل مشاهده است. لازم بذکر است که به مجموع آزمایش‌های انجام یافته روی نمونه‌ها به تعداد ۲۵٪، جهت تکرار افزوده شده است.



شکل ۴. تصویری از آزمون‌های صورت گرفته بر روی مصالح مورد مطالعه: الف- آزمون برش مستقیم ب- آزمون تک محوری، ج- آزمون نفوذپذیری با ارتفاع متغیر

جدول ۳. برنامه آزمون‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر

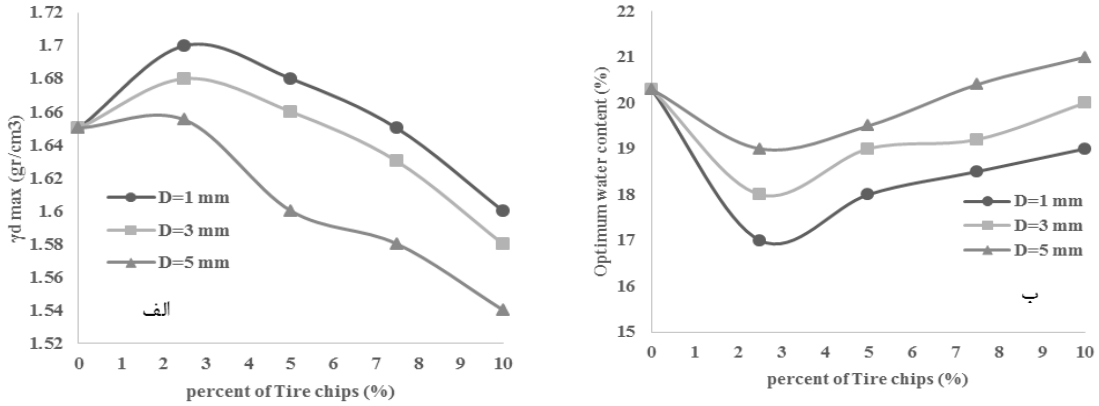
برنامه‌ریزی			ذرات گرانول لاستیک بازیافتی			آزمایشات				
ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	۱ میلی‌متر	۳ میلی‌متر	۵ میلی‌متر	چگالی ویژه	تراکم	تک‌محوری	برش مستقیم	نفوذپذیری
۱	C	رس کائولن	۰	۰	۰	*	*	*	*	*
۲	C-2.5-1	رس کائولن	۲/۵	-	-	*	*	*	*	*
۳	C-5-1	رس کائولن	۵	-	-	*	*	*	*	*
۴	C-7.5-1	رس کائولن	۷/۵		-	*	*	*	*	*
۵	C-10-1	رس کائولن	۱۰		-	*	*	*	*	*
۶	C-2.5-3	رس کائولن	-	۲/۵	-	*	*	*	*	*
۷	C-5-3	رس کائولن	-	۵	-	*	*	*	*	*
۸	C-7.5-3	رس کائولن	-	۷/۵	-	*	*	*	*	*
۹	C-10-3	رس کائولن	-	۱۰	-	*	*	*	*	*
	C-2.5-5	رس کائولن		-	۲/۵	*	*	*	*	*
	C-5-5	رس کائولن		-	۵	*	*	*	*	*
	C-7.5-5	رس کائولن		-	۷/۵	*	*	*	*	*
	C-10-5	رس کائولن		-	۱۰	*	*	*	*	*

www.SID.ir

Archive of SID

۴- بحث و بررسی

نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ذرات گرانول لاستیک بازیافتی طبق شکل (۵- الف و ب) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵- الف) مشاهده می‌شود، افزودن ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به میزان ۲/۵ درصد وزنی به خاک رس سبب بهبود وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) و افزایش تراکم‌پذیری شده است. میزان افزایش γ_{dmax} با در نظر گرفتن ذرات گرانول با اندازه‌های ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر، به ترتیب ۳ ٪، ۱/۸۱ ٪ و ۰/۳ ٪ است. اگرچه، با افزایش درصد حضور ذرات گرانول لاستیک در خاک رس وزن مخصوص خشک حداکثر کاسته شده است. مقدار کاهش با توجه به اندازه ذرات گرانول لاستیک (۱، ۳ و ۵ میلی‌متر) در درصدهای مورد مطالعه به طور میانگین به ترتیب برابر ۱/۹۳ ٪، ۲/۳۶ ٪ و ۳/۷۶ ٪ است. همانطور که در نمودارهای شکل (۵- ب) می‌توان دید، حضور ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به میزان ۲/۵ درصد وزنی، مقدار رطوبت بهینه جهت انجام تراکم را با توجه به اندازه‌های گرانول (۱، ۳ و ۵ میلی‌متر) به ترتیب به میزان ۱۹/۴ ٪، ۱۱/۳ ٪ و ۶/۴ ٪ کاهش می‌دهد. اگرچه با افزایش میزان ذرات لاستیک، مقدار رطوبت بهینه جهت انجام تراکم یک روند رو به بالا را طی می‌نماید. بنابراین، با افزایش درصد ذرات گرانول لاستیک و اندازه آن‌ها وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد که مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط اسدزاده و سلطانی، ۱۳۹۱؛ ارثی‌زاد و سلطانی، ۱۳۹۴ و کارآمد تبریزی و همکاران، ۱۳۹۴) است.



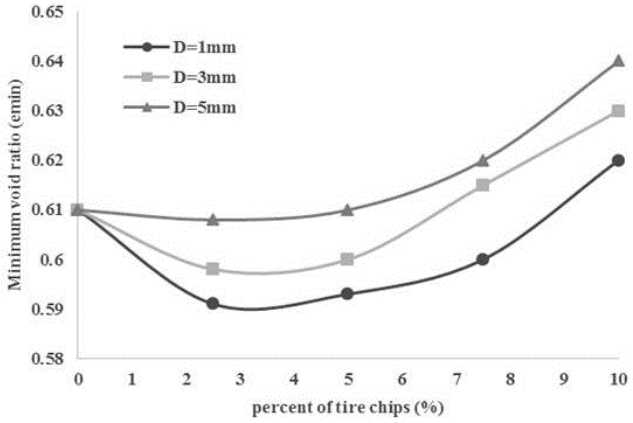
شکل ۵. الف و ب: تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر نتایج حاصل از آزمایش تراکم، الف- تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- تغییرات رطوبت بهینه

این شرایط با توجه به تغییرات نسبت تخلخل حداقل در نمونه‌های تثبیت شده طبق نمودارهای شکل (۶) می‌توان تفسیر نمود. همانطور که مشاهده می‌شود ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به اندازه ۱ میلی‌متر و با میزان ۲/۵ درصد وزنی بیش‌ترین کاهش را در نسبت تخلخل حداقل ایجاد نموده است. این شرایط بیان کننده تماس بیش‌تر ذرات خاک رس و لاستیک به یکدیگر و نزدیک شدن آن‌ها به یکدیگر با توجه به خاصیت انعطاف‌پذیری ذرات گرانول بازیافتی است. در ادامه، در همان درصد وزنی مشابه مشاهده می‌گردد، با بالا رفتن ابعاد ذرات گرانول لاستیک بازیافتی فضای خالی بین ذرات رس افزایش می‌یابند. در انتها، با ملاحظه نمودارها می‌توان دید افزودن ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بیش از ۲/۵ ٪ در تمامی ابعاد سبب سست شدن ساختار خاک و افزایش فضای خالی بین ذرات شده است.

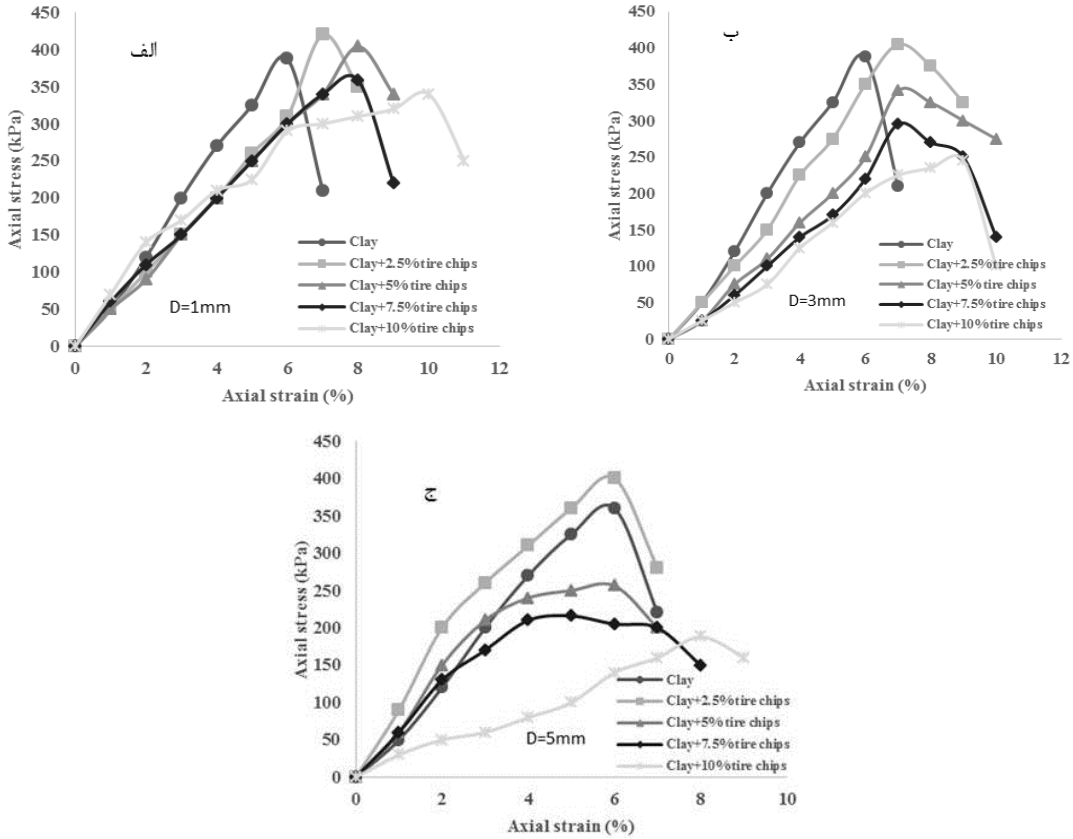
۲- میزان تغییرات تنش فشاری تک‌محوری در نمونه‌های رسی تثبیت شده با ذرات گرانول لاستیک بازیافتی با استفاده از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری ارزیابی گردید که نتایج در شکل (۷- الف، ب و ج) ارائه شده است. با توجه به نمودارها می‌توان مشاهده کرد، رفتار خاک رس تثبیت شده با ذرات گرانول لاستیک به اندازه ۱ میلی‌متر با درصد وزنی ۲/۵ بهبود یافته و بطوریکه حضور ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر مقاومت فشاری تک‌محوری در لحظه گسیختگی خاک‌رس تاثیر می‌گذارد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر تغییرات نسبت تخلخل حداقل خاک رس مورد مطالعه



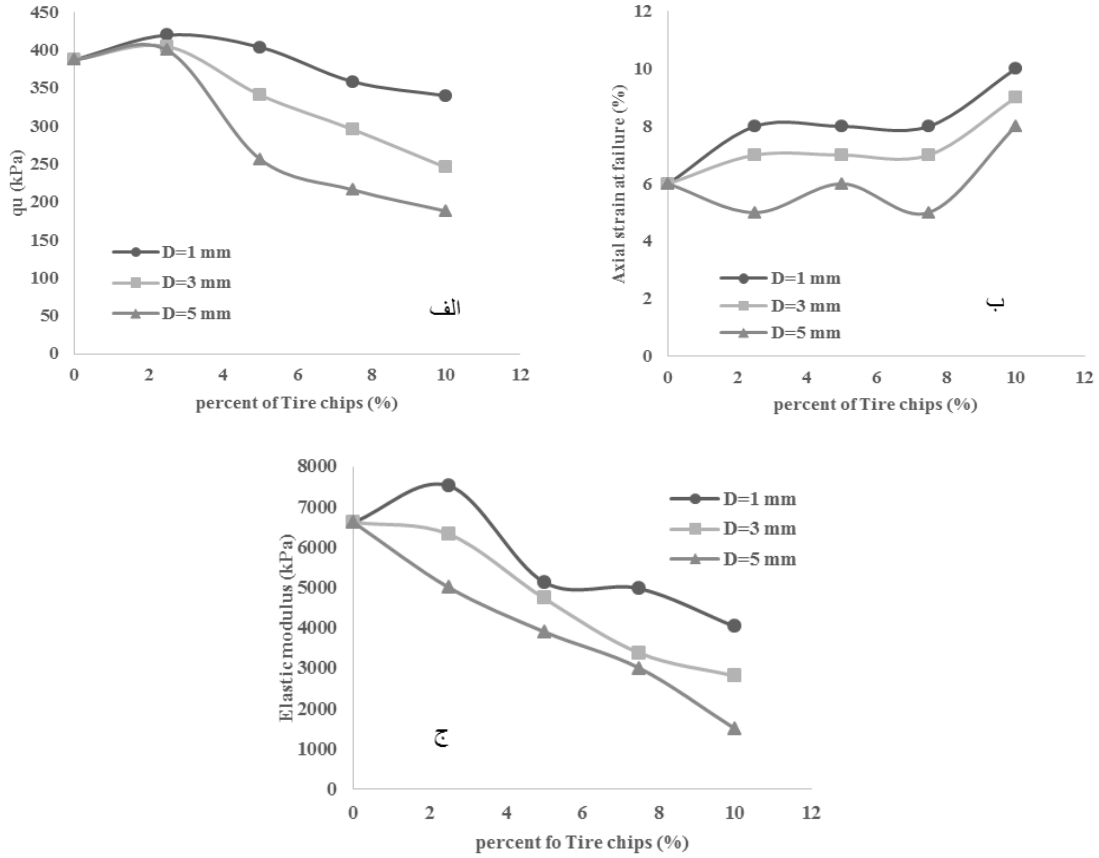
شکل ۷. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های رسی تثبیت شده، الف- ذرات لاستیک بازیافتی با قطر ۱ میلی‌متر، ب- ذرات لاستیک بازیافتی با قطر ۳ میلی‌متر، ج- ذرات لاستیک بازیافتی با قطر ۵ میلی‌متر

با توجه به شکل (۸- الف) دیده می‌شود، افزودن ذرات لاستیک بازیافتی به قطرهای ۱ و ۳ میلی‌متر به میزان درصد وزنی ۲/۵ باعث افزایش توانایی باربری به ترتیب به مقدار ۸/۴ ٪ و ۴/۵ ٪ شده است. اگرچه افزایش بیش‌تر درصد وزنی ذرات لاستیک در قطرهای مذکور باعث کاهش میزان توانایی باربری بطور میانگین به ترتیب به میزان ۸/۶ ٪ و ۲۲/۳ ٪ شده است. از سوی دیگر، زمانیکه قطر ذرات لاستیک برابر ۵ میلی‌متر انتخاب گردید، مشاهده شد در تمام ذرات وزنی، مقاومت فشاری تک محوری بطور میانگین به میزان ۱۶/۴ ٪ کاسته شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان دید ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر روی میزان شکل‌پذیری خاک رس تثبیت شده موثر است. با توجه به نمودارهای شکل (۸- ب)، ذرات گرانول لاستیک با ابعاد ۱ ،۳ و ۵ میلی‌متر بطور میانگین به ترتیب به مقدار ۱۴/۵ ٪، ۱۱/۳ ٪ و ۶/۶۵ ٪ شکل‌پذیری نمونه‌های تثبیت شده رس را افزایش داده است. از پارامترهای مهم در ارزیابی میزان نشست و خصوصیات ژئوتکنیکی در خاک‌ها، پارامتر مدول‌الاستیسیته است. با توجه به شکل (۸- ج)، ذرات گرانول لاستیک می‌تواند مدول‌الاستیسیته (E) خاک رس را بهبود ببخشد. زمانی‌که ذرات گرانول لاستیک با قطر ۱ میلی‌متر به مقدار ۲/۵ درصد وزنی افزوده می‌شود، مدول‌الاستیسیته به میزان ۱۳/۶٪ افزایش یافته است. البته با بالا رفتن اندازه ذرات لاستیک و درصدهای وزنی آن‌ها، تاثیر منفی بر روی ضریب ارتجاعی داشته و برای اندازه‌های ذرات ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر، به ترتیب بطور میانگین به میزان ۲۵/۶ ٪، ۱۸/۷۵ ٪ و ۲۹/۷۵ ٪ کاهش داده است. نتایج بدست آمده مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط (وادی و همکاران، ۲۰۱۵؛ رهگذر و صابرایان، ۲۰۱۶؛ سولانکی و همکاران، ۲۰۱۷ و سینگ و سونتوال، ۲۰۱۷) می‌باشد.

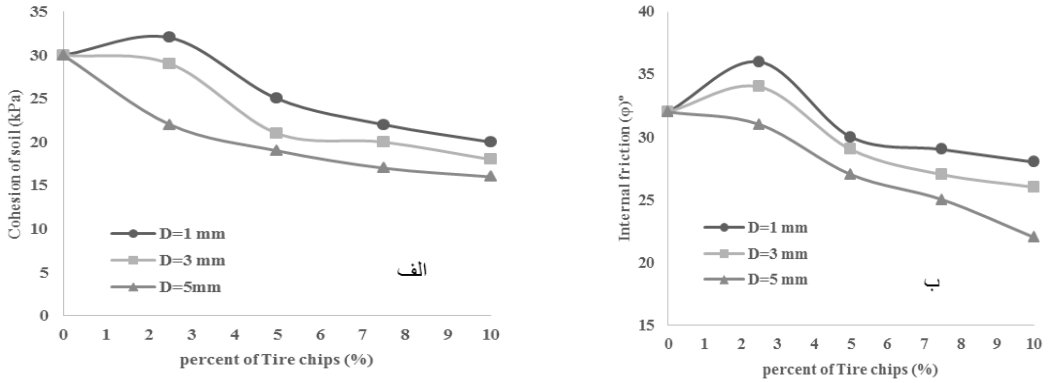


شکل ۸. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر پارامترهای ژئوتکنیکی بدست آمده از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، الف- مقاومت فشاری درلحظه گسیختگی، ب- کرنش محوری در لحظه گسیختگی، ج- مدول‌الاستیسیته

۳- تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک رس با استفاده از آزمون برش مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییرات میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های خاکی مورد مطالعه تحت اثر ذرات گرانول لاستیک در شکل (۹- الف وب) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای شکل (۹- الف) مشاهده می‌شود ذرات لاستیک بازیافتی به اندازه ۱ میلی‌متر و با درصد وزنی ۲/۵ می‌تواند مقدار چسبندگی خاک رس را به مقدار ۶/۷ درصد افزایش دهند. ولی با افزایش درصد وزنی ذرات لاستیک مقدار چسبندگی بطور میانگین به مقدار ۲۲/۳ درصد کاهش داده است.

www.SID.ir

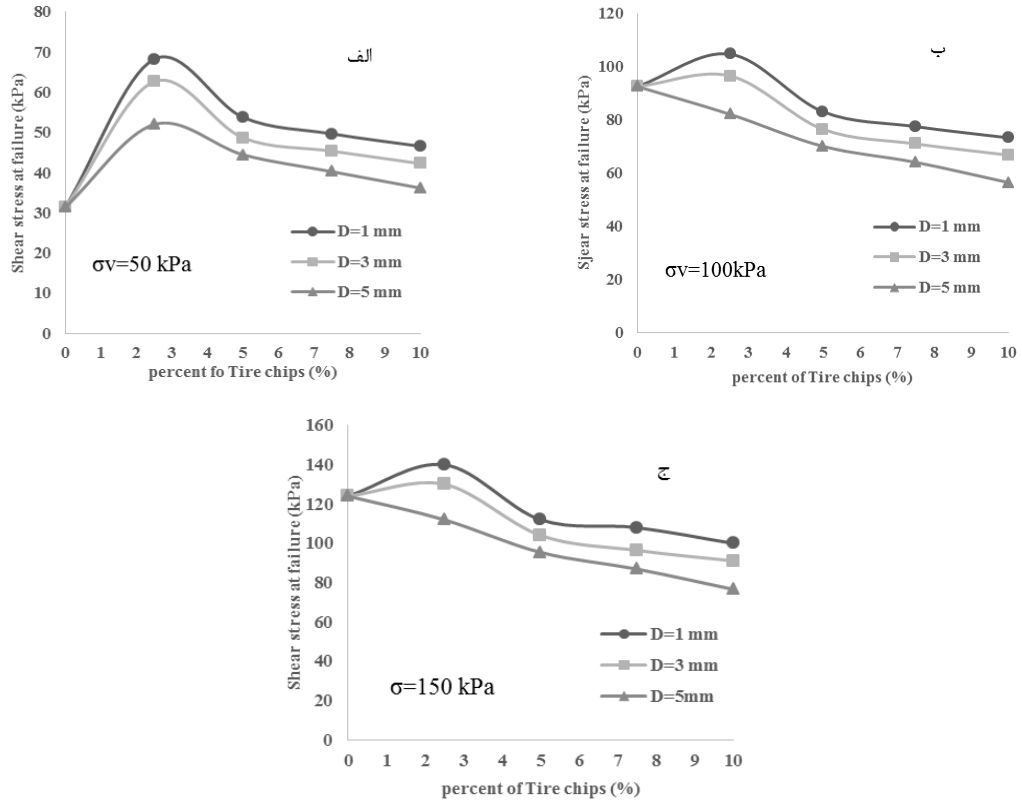
Archive of SID



شکل ۹. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده حاصل از آزمون برش مستقیم، الف- چسبندگی، ب- زاویه اصطکاک داخلی

در همین شرایط طبق شکل (۹- ب) مشاهده شد زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده با ۲/۵ درصد لاستیک به اندازه ۱ میلی‌متر به مقدار ۱۲/۵ درصد بهبود یافته است. اگرچه، با افزایش حضور میزان ذرات لاستیک زاویه اصطکاک داخلی بطور میانگین به مقدار ۱۰/۶ درصد کاسته شده است. از سوی دیگر، با در نظر گرفتن دیاگرام‌ها می‌توان دید با افزایش اندازه ذرات لاستیک و درصد وزنی‌ها میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است.

۴- تاثیر ذرات گرانول لاستیک بر روی میزان مقاومت برشی در لحظه گسیختگی در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه ارزیابی شده و نتایج آن طبق شکل (۱۰- الف، ب و ج) قابل مشاهده است.



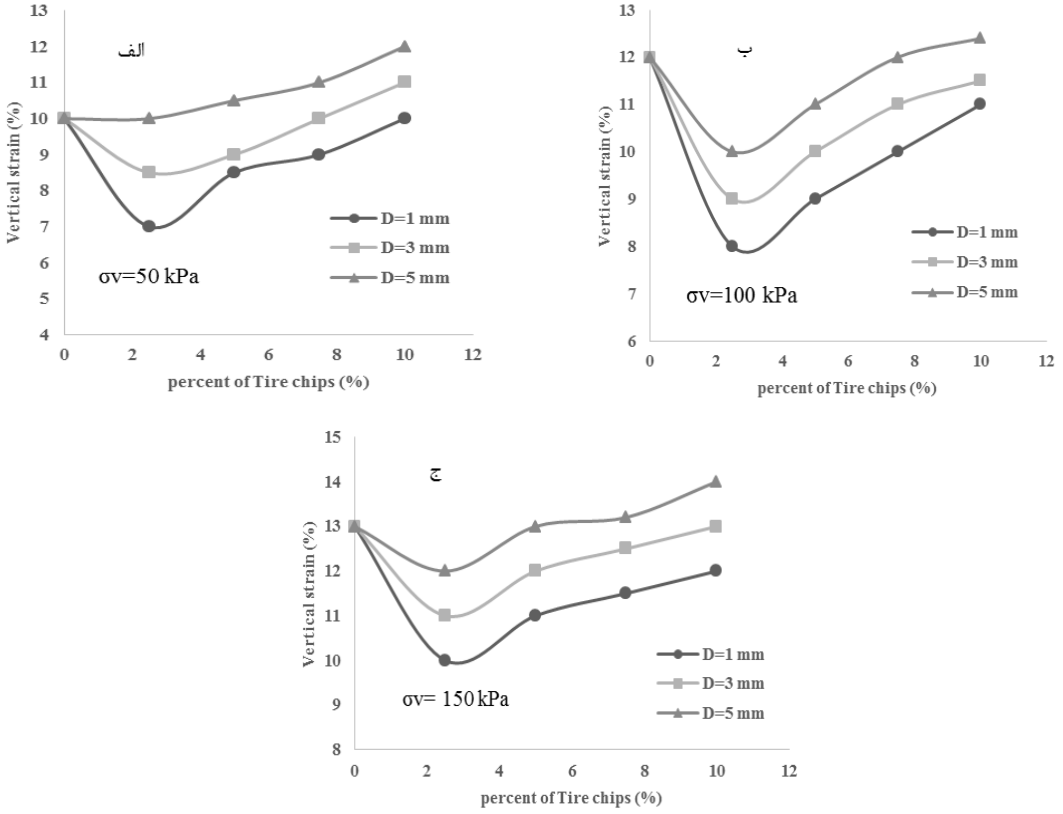
شکل ۱۰. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر مقاومت برشی خاک در لحظه گسیختگی، الف- تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، ب- تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال، ج- تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال

www.SID.ir

Archive of SID

همانگونه که از نمودارها می‌توان نتیجه‌گیری نمود، ذرات لاستیک بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی تاثیرگذار می‌باشند. با توجه به شکل (۱۰- الف) مشاهده می‌گردد در تمامی تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال، ذرات لاستیک در اندازه‌های ۱ و ۳ میلی‌متر، با درصد وزنی ۲/۵ مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را افزایش می‌دهند. این میزان افزایش در تمامی تنش‌های قائم بطور میانگین به ترتیب برابر با ۴۴/۴ ٪ و ۳۶/۰۵ ٪ می‌باشد.

۵- تاثیر ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر روی مقدار کرنش قائم نمونه‌های خاکی رس تثبیت شده حاصل از آزمون برش مستقیم برآورد گردیده و نتایج آن در شکل (۱۱- الف، ب و ج) ارائه شده است. باتوجه به نمودارها مشاهده شد در تمامی مقادیر تنش قائم، ذرات لاستیک با اندازه ۱ میلی‌متر با درصد وزنی ۲/۵ بیش‌تر سبب کاهش کرنش قائم در خاک رس تثبیت شده در تمام تنش‌ها بطور میانگین برابر ۲۸/۶ ٪ نسبت به حالت رس خالص گردیده است. در همان درصد وزنی مشابه، با افزایش اندازه ذرات لاستیک به ۳ و ۵ میلی‌متر دیده می‌شود نرخ کرنش قائم به ترتیب بصورت میانگین برابر ۱۸/۳ ٪ و ۷/۹ ٪ افزایش یافته است. اگرچه با افزایش حضور ذرات لاستیک در نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌گردد تاثیرگذاری ذرات لاستیک در میزان کرنش قائم کاهش یافته است.



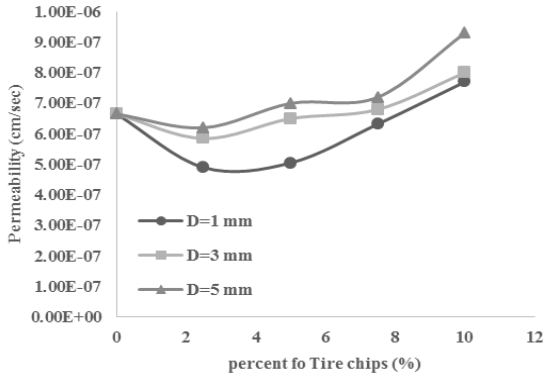
شکل ۱۱. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بر میزان کرنش قائم نمونه‌های مورد مطالعه، الف- تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، ب- تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال، ج- تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال

۶- در تحقیق حاضر به منظور بررسی تاثیر اندازه و درصد ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر روی امکان ایجاد شرایط زهکشی خاک رس، آزمون نفوذپذیری با روش ارتفاع متغیر بر روی نمونه‌های مخلوط انجام گرفت و نتایج آن طبق شکل (۱۲) ارائه شده است. با توجه به نمودار می‌توان دید، اولا تمامی اندازه‌های ذرات لاستیک مورد مطالعه جهت کاهش نفوذپذیری خاک رس با ۲/۵ درصد وزنی مناسب است. با این تفاوت که گرانول لاستیک با اندازه ۱ میلی‌متر بیش‌ترین تاثیر را در کاهش نفوذپذیری دارد. ثانیا، در تمامی اندازه‌های ذرات لاستیک

www.SID.ir

Archive of SID

با بالا رفتن درصد حضور آن‌ها در خاک رس نفوذپذیری و خاصیت زهکشی افزایش می‌یابد. این شرایط نیز متاثر از ساختار و اسکلت دانه‌بندی خاک رس و نسبت تخلخل حداقل خاک رس تثبیت شده می‌باشد.



شکل ۱۲. تاثیر ذرات گرانول لاستیک بر میزان نفوذپذیری نمونه‌های مورد مطالعه

با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده که در بخش‌های قبل به آن اشاره شده است، می‌توان بیان کرد اضافه شدن ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به رس در درصدهای مختلف بر رفتار ماتریس مخلوط ذرات گرانول لاستیک و رس تاثیرگذار باشد. هنگامی‌که ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به خاک رس افزوده می‌گردند، این ذرات با یکدیگر تماس نداشته و به عبارت دیگر به صورت غوطه ور میان دانه‌های ریزخاک رس قرار دارند و نمی‌توانند با یکدیگر در باربری ماتریس مخلوط رس و ذرات گرانول لاستیک نقش داشته باشند، بلکه تنها به عنوان انتقال دهنده نیرو بین دانه‌های ریز اطراف خودشان عمل می‌کنند. در این شرایط حجم ذرات لاستیک در کل فضای نمونه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در این حالت پارامتری تحت عنوان نسبت تخلخل بین دانه‌های ریز قابل معرفی بوده که با استفاده از رابطه زیر می‌توان تعیین نمود:

$$e_f = \frac{e}{fC} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، e_f نسبت تخلخل بین دانه‌های ریزدانه نامیده می‌شود. حال در صورتی‌که ریزدانه‌های موجود در خاک از جنس رس باشند علاوه بر آنکه به عنوان پرکننده در بافت خاک عمل می‌کند، می‌تواند با القاء چسبندگی به خاک بافت آن را یکپارچه‌تر سازند. بنابراین با توجه به مطالعه صورت گرفته در تحقیق حاضر می‌توان طبق جدول (۴) مقادیر e_{min} و e_f را ارائه نمود.

جدول ۴. تاثیر درصد سنگدانه‌های آجر بر روی نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) و نسبت تخلخل بین‌دانه‌ای (e_f)

تنش	e_{min}			e_f		
درصد ذرات لاستیک	D=1mm	D=3mm	D=5mm	D=1mm	D=3mm	D=5mm
۰	۰/۶۱	–	–	۱	–	–
۲/۵	۰/۵۹۱	۰/۵۹۸	۰/۶۰۸	۰/۶۰۶	۰/۶۱۳	۰/۶۲۳
۵	۰/۵۹۳	۰/۶	۰/۶۱	۰/۶۲۴	۰/۶۳۱	۰/۶۴۲
۷/۵	۰/۶	۰/۶۱۵	۰/۶۲	۰/۶۴۸	۰/۶۶۵	۰/۶۷۰
۱۰	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۸۸	۰/۷	۰/۷۱۱

با مشاهده جدول فوق می‌توان دریافت، افزودن ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به اندازه ۱ میلی‌متر به مقدار ۲/۵ درصد وزنی به خاک رس، فضای خالی بین ذرات را به حداقل‌ترین میزان رسانده است. این شرایط با توجه به خاصیت ارتجاعی و جذب پایین آب توسط ذرات لاستیک به وقوع پیوسته که در نتیجه تراکم‌پذیری خاک افزایش یافته و توانایی باربری خاک مخلوط بهبود یافته است که نتایج آزمایش‌های انجام یافته به این واقعیت اشاره

www.SID.ir

Archive of SID

می‌نمایند. البته در همان درصد وزنی مشابه، با افزایش اندازه قطر گرانول‌های لاستیک بازیافتی نسبت تخلخل حداقل افزایش یافته است که بیان کننده سست شدن ساختار خاک و کاهش توانایی باربری خاک است. این شرایط بدلیل سبک بودن ذرات گرانول لاستیک نسبت به دانه‌های ریز خاک رس و همراه با کاهش انعطاف‌پذیری و عدم امکان چسبندگی مناسب بین ذرات لاستیک و رس به وقوع پیوسته است. از سوی دیگر، با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌گردد، افزایش اندازه ذرات گرانول لاستیک و درصد حضور آن‌ها بیش از ۲/۵ ٪ سبب تشدید در ایجاد ساختار سست و افزایش فضای خالی بین ذرات خاک مخلوط شده که البته پایین بودن جذب آب توسط ذرات لاستیک مزید علت شده است. هم‌چنین، مقدار نسبت تخلخل بین دانه‌ای نیز بیان کننده آن است که افزودن ذرات لاستیک به خاک رس باعث افزایش نقش آن‌ها در رفتار خاک رس شده است.

۵- نتایج

نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر را می‌توان بصورت خلاصه به شرح ذیل اشاره نمود:

۱- نتایج آزمون تراکم نشان داد افزودن ذرات گرانول لاستیک بازیافتی در تمام اندازه‌ها به میزان ۲/۵ درصد وزنی به خاک رس سبب بهبود وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه شده است. اگرچه در درصدهای بالا ذرات لاستیک، مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط اسدزاده و سلطانی (۱۳۹۱)، ارثی‌زاد و همکاران (۱۳۹۴) و (کارآمد تبریزی و همکاران، ۱۳۹۴) روند برعکس شده و سبب ایجاد یک ساختار سست و پوک در خاک رس شده است.

۲- با توجه به نتایج آزمایش تراکم مشاهده شد ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به اندازه ۱ میلی‌متر و به میزان ۲/۵ درصد وزنی بیش‌ترین کاهش را در نسبت تخلخل حداقل ایجاد نمود. این شرایط بیان کننده تماس بیش‌تر ذرات خاک رس و لاستیک به یکدیگر است. در ادامه، مشاهده شد ذرات گرانول لاستیکی با ابعاد بزرگ‌تر و با افزایش حضور بیش از ۲/۵ ٪ باعث افزایش فضای خالی بین ذرات رس گردیده‌اند که علت آن تا حدودی مربوط به خاصیت ارتجاعی ذرات لاستیک، وزن سبک و پایین بوده خاصیت پایین جذب آب ذرات لاستیک بازیافتی می‌باشد که چسبندگی مناسب را در ساختار و بافت نمونه‌های خاکی مخلوط نمی‌تواند بوجود آورد.

۳- افزودن ذرات لاستیک بازیافتی به قطرهای ۱ و ۳ میلی‌متر به میزان درصد وزنی ۲/۵ باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری گردیده است. اما، افزایش درصد وزنی ذرات لاستیک در قطرهای مذکور باعث کاسته شدن میزان توانایی باربری شد. از سوی دیگر، گرانول لاستیک با قطر ۱ میلی‌متر به مقدار ۲/۵ درصد باعث افزایش مدول‌الاستیسیته خاک رس شده و در حالت کلی، ذرات گرانول لاستیک با ابعاد ۱ ،۳ و ۵ میلی‌متر در تمامی درصدها سبب افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های رسی تثبیت شده است. اگرچه افزایش اندازه ذرات لاستیک و بالا رفتن حضور ذرات گرانول در خاک رس سبب کاهش توانایی باربری و شکل‌پذیری در رس می‌گردد که مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط (وادی و همکاران، ۲۰۱۵؛ رهگذر و صابرایان، ۲۰۱۶؛ سولانکی و همکاران، ۲۰۱۷ و سینگ و سونتوال، ۲۰۱۷) می‌باشد.

۴- با بررسی نتایج آزمون برش مستقیم مشاهده گردید، ذرات گرانول لاستیک بازیافتی به اندازه‌های ۱ و ۳ میلی‌متر و با درصد وزنی ۲/۵ می‌تواند مقدار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک رس و به تبع آن مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را افزایش داد. از سوی دیگر، در حالت کلی با افزایش اندازه ذرات لاستیک و درصد وزنی‌ها میزان چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و توانایی باربری کاهش یافت. این شرایط بیان‌کننده آن است افزودن ذرات ریز لاستیک بازیافتی سبب بالا رفتن میزان سختی خاک رس تثبیت شده گردیده است و بویژه پایین بودن جذب آب و انعطاف‌پذیری بیش‌تر ذرات ریز لاستیک باعث چسبندگی مناسب بین ذرات ماتری مخلوط شده است.

۵- ذرات گرانول لاستیک با اندازه ۱ میلی‌متر با درصد وزنی ۲/۵ بیش‌تر سبب کاهش کرنش قائم در خاک رس تثبیت شده نسبت به حالت خالص گردیده است. اگرچه با افزایش حضور ذرات لاستیک و اندازه قطر آن‌ها در نمونه‌ها مشاهده شد میزان نشست و تغییر شکل افزایش یافت. این شرایط بیان‌کننده آن است رفتار نشست‌پذیری نمونه‌های خاکی تثبیت شده به اندازه ذرات لاستیک بازیافتی و درصد آن‌ها بستگی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

۶- افزودن ذرات گرانول لاستیک به اندازه ۱ میلی‌متر به مقدار ۲/۵ درصد وزنی به خاک رس، فضای خالی بین ذرات را به حداقل‌ترین میزان رسانده است. در نتیجه تراکم‌پذیری خاک افزایش یافته و توانایی باربری خاک مخلوط بهبود یافته است البته در همان درصد وزنی مشابه، با افزایش اندازه قطر گرانول‌های لاستیک نسبت تخلخل حداقل افزایش یافته است که بیان کننده سست شدن ساختار خاک و کاهش توانایی باربری خاک است. هم‌چنین، مقدار نسبت تخلخل بین دانه‌ای نیز بیان کننده آن است که افزودن ذرات لاستیک به خاک رس باعث افزایش نقش آن‌ها در رفتار خاک رس شده است.

۷- با توجه به نتایج آزمون نفوذپذیری مشاهده گردید، در تمامی اندازه‌های ذرات لاستیک مورد مطالعه جهت کاهش نفوذپذیری خاک رس با ۲/۵ درصد وزنی مناسب است. با این تفاوت که گرانول لاستیک با اندازه ۱ میلی‌متر بیش‌ترین تاثیر را در کاهش نفوذپذیری دارد. البته، در تمامی اندازه‌های ذرات لاستیک با بالا رفتن درصد حضور آن‌ها در خاک رس نفوذپذیری و خاصیت زهکشی افزایش می‌یابد. این شرایط متاثر از خاصیت جذب پایین آب توسط ذرات لاستیک بازیافتی و اسکلت دانه‌بندی خاک رس تثبیت شده می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

بهسازی و تقویت خاک‌های مساله‌دار نیازمند به کاربرد مصالح مناسبی است. بنابراین خرده‌های لاستیک بازیافتی می‌تواند به عنوان یک گزینه پیشنهادی جدید در این خصوص مطرح باشد. با توجه به اینکه امروزه دفع لاستیک‌های فرسوده یکی از معضلات و مسائل اساسی در مهندسی محیط‌زیست مطرح است. لذا در تحقیق حاضر به بررسی بهبود توانایی باربری خاک رس کائولنی با شاخص خمیری متوسط به همراه مخلوط ذرات گرانول لاستیک‌های فرسوده (باهدف کاهش آلاینده‌های زیست محیطی) بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی پرداخته شده است. بدین منظور جهت بهسازی و تثبیت خاک رس از ذرات گرانول لاستیک بازیافتی با قطرهای ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر استفاده شده و با درصدهای ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ مخلوط گردید. باتوجه به نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر می‌توان بیان نمود ذرات گرانول لاستیک بازیافتی بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رس کائولنی با شاخص خمیری متوسط می‌تواند تاثیر گذار باشد. اندازه و درصد وزنی بهینه ذرات گرانول لاستیکی به ترتیب برابر ۱ میلی‌متر و ۲/۵ برآورد شده است. این مقادیر با توجه به خاصیت ارتجاعی و انعطاف‌پذیری و پایین بودن جذب آب ذرات گرانول لاستیک بازیافتی سبب ایجاد یک ساختار جدید بین ذرات خاک رس همراه با افزایش سختی و چسبندگی شده است که میزان توانایی باربری، مدول الاستیسیته را افزایش و مقدار نفوذپذیری و تغییر شکل را کاهش داده است. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد از زائدات لاستیکی و جامد به منظور مدیریت مواد پسماند در شهرهای بزرگ جهت ساخت ابنیه‌های ژئوتکنیکی، لایه‌های روسازی راه و خاکریز پشت دیوار حائل مورد استفاده قرار گیرد. مناسب است که در آینده نسبت به مطالعه رفتار مصالح جامد زائد دیگر در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مساله‌دار جهت کاربرد در ساخت و سازها و ابنیه‌های ژئوتکنیکی تحقیقات مناسب صورت گیرد.

منابع

Asadzadeh, M. and Soltani Jigheh, H (2012) Swelling and Consolidation Properties of Clayey Soils Reinforced with Tire Chips, Journal of Civil Engineering, Ferdowsi University, 23 (2): 91-102. (In Persian)

ASTM D422-63 (1963) Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils, Annual book of ASTM standards (reapproved 1998).

ASTM D421-85 (1985) Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, Annual book of ASTM standards, (reapproved 1998).

ASTM D 4318-95a (1995) Standard test method for liquid limit, plastic limit an plasticity index for soils, Annual book of ASTM standards.

ASTM-D 854-02 (2002) Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards.

ASTM-D 698-00 (2000) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)), Annual book of ASTM standards.

ASTM D2166-16 (2016) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual book of ASTM standards.

ASTM D3080-11 (2011) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions, Annual book of ASTM standards.

www.SID.ir

Archive of SID

ASTM D5084-03 (2003) Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using flexible wall permeameter, Annual book of ASTM standards.

Ayothiraman, R. and Meena, A. K (2011) Improvement of Subgrade Soil with Shredded Waste Tyre Chips, Proceeding of Indian Geotechnical Conference, 1-4

Bosscher, P. J., Edil, T. B., and Kuraoka, S (1997) Design of highway embankments using tire chips, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(4): 295-304.

Cetin, H., Fener, M. and Gunaydin, O (2006) Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", Engineering Geology, 88 (1–2):110-120.

Edil, T. and Bosscher, P (1994) Engineering properties of tire-chips and soil mixtures, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 17(4):453-464.

Edil, T. B., Park, J. K. and Kim, Y. K (2004) Effectiveness of scrap tire chips as sportive drainage material, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 130(7): 824-831.

Ersizad, A., Soltani Jigheh, H. and Asadzadeh, M (2015) Behavior of Clayey soils Mixed with Tire Chips, Journal of Civil Engineering, Ferdowsi University, 26(2): 117-130. (In Persian)

Iran China Clay Industries Company, Marand, East Azerbaijan, Iran. www.icckaolin.com.

Karamad Tabrizi, M., Abrishami, S. and Seyyedi Hosseini Nia, E (2015) Effects of Granules Tire on Clay Dry unit weight, 2nd National conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Qom University of Technology, 1-9. (In Persian).

Lee, J. H., Salgado, R., Bernal, A., and Lovell, C. W (1999) Shredded tires and rubber–sand as lightweight backfill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125:132-141.

Poh, P. S. H., and Broms, B. B (1995) Slope stabilization using oldrubber tires and geotextiles, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 9(1): 76–80.

Rahgozar, M. A. and Saberian, M (2016) Geotechnical Properties of Peat Soil Stabilized with Shredded Waste Tire Chips, Mires and Peat, 18: 1-12.

Ratnam, A. V., Prasad, D. S. V., Prasada R., G. V. R. and Ratna, P. S (2016) Influence of Waste Tyre Rubber Chips on Strength and Settlements of Soils, International Journal of Engineering Innovation and Researches, 5(4): 282-287.

Singh, J. and Sonthwal, K. V (2017) Improvement of Engineering Properties of Clayey Soil using Shredded Rubber Tube, International Journal of Theoretical and applied Sciences, 9(1): 1-6.

Solanki, D., Dave M. and Purohit D. G. M (2017) Stabilization of Clay Soil Mixed with Rubber Tyre Chips for Design in Road Construction, International Journal of Engineering Science Invention, 6(9): 2319-6734.

Vadi, P. K., Ganga, D., Priyadarsini, P. S. and Naga Bharath, Ch (2015) Experimental Investigation on California Bearing Ratio for Mechanically Stabilized Expansive Soil using Waste Rubber Tyre Chips, International Journal of Civil Engineering and Technology, 6(11): 97-110.

Warith, M. A., and Sudhakar, M. R (2006) Predicting the compressibility behaviour of tire shred samples for landfill applications, Waste Management, 26: 268-276.

Wu, W. Y., Benda, C. C. and Cauley, R. F (1997) Triaxial determination of shear strength of tire chips, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(5): 479-482.

Yang, S., Lohnes, R. A. and Kjartanson, B. H (2002) Mechanical properties of shredded tires, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 25(1): 44-52.

Youwai, S. and Bergado, D. T (2004) Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material, Computers and Geotechnics, 31(2): 103-114.

Zareh Sh., M (2011) Strategic Analysis in Tire Industry of Iran, Iran Rubber Magazine, 26:6-15. (In Persian).

www.SID.ir

Archive of SID

Effects of Waste Tire Granule Particles on Geotechnical Properties of Clay Soil

H. Bagheri [1] and R. Dabiri[2*]

1, 2- Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

Recieved: 2018/8/2 Accepted: 2019/3/3

Abstract

For improvement and stabilization of problematic soils in terms of geotechnical properties, it should be required to use proper materials. Therefore, tire chips is as new option can be suggested. On the other side, disposing of waste tire is one of the environmental problems. In present study, improving bearing capacity of kaolinite clay soil with using granule particle of tire waste (with aim of reducing environmental pollutants) based on laboratory tests have been investigated. Waste tire Granule particles in 1, 3 and 5 mm diameters and 2.5, 5, 7.5 and 10 percentage were mixed with clay. For evaluating geotechnical properties of stabilized clayey soil, compaction, uniaxial, direct shear and permeability tests were performed. Results of this study showed that, optimum of particle size and waste tire particle content are respectively 1 mm and 2.5 percentage (by weight). So that, in this values minimum void ratio significantly decreased in improved specimens. Consequently, bearing capacity and compressibility were growth. Also, with adding waste tire granule particle by a size larger than 1 mm and more 2.5 % content in improved soil, permeability went up.

Keywords: Kaolinite clay soil, Waste tire granule, Environmental geotechnics, Improvement, Geotechnical properties.

www.SID.ir